

УДК 621.317.846

РАЗРАБОТКА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

А.В. ГУСИНСКИЙ, М.Ю. ДЕРЯБИНА, А.М. КОСТРИКИН, В.Т. РЕВИН, Ю.А. ГУСЫНИНА,
А.Б. ДЗИСЯК, А.Я. БЕЛЬСКИЙ, А.В. ВОРОШЕНЬ, С.С. ГУРСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Анализируются современные перспективные методы измерения параметров СВЧ устройств. Описываются сверхвысокочастотные генераторы качающейся частоты, векторные и скалярные анализаторы цепей, автоматические измерители флуктуаций амплитуды, частоты и фазы СВЧ сигнала, а также комплекс эталонных средств измерений СВЧ мощности в диапазоне частот 37,50–178,60 ГГц. Рассматривается метрологическое обеспечение ВАЦ при использовании мер фазового сдвига специальной конструкции.

Ключевые слова: сверхвысокая частота, анализатор цепей, генератор, эталон мощности, мера фазового сдвига, флуктуация.

Введение

Широкое использование сверхвысокочастотных радиоустройств в построении систем, служащих для скоростной передачи информации, систем радиолокации и радионавигации, систем связи и телевидения, систем для измерения таких параметров, как перемещение, скорость, вибрация и т.д., обуславливает необходимость разработки средств измерений сверхвысокочастотного диапазона длин волн, а также решения вопросов их метрологического обеспечения. С точки зрения метрологии решение этих задач в коротковолновой части СВЧ диапазона (миллиметровом диапазоне длин волн) связано с решением ряда уникальных проблем, поскольку размеры компонентов на этих частотах сравнимы с длиной волны.

Лаборатория аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР в течение длительного времени занимается решением этой актуальной проблемы: разрабатывает современные автоматизированные средства измерений для качественной настройки и производства устройств миллиметрового диапазона длин волн, а также метрологическое обеспечение измерений в этом диапазоне частот.

В лаборатории был разработан комплекс измерительной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн: источники измерительных сигналов (генераторы качающейся частоты), скалярные и векторные анализаторы цепей, измерители амплитудных и фазовых флуктуаций параметров сигналов. Большое внимание уделено решению вопросов, связанных с метрологическим обеспечением разработки и производства этой измерительной аппаратуры.

15-минутный интервал после установления рабочего режима $\pm 1 \cdot 10^{-6} \cdot f_{max}$ (f_{max} — максимальное значение частоты);

- допустимая основная погрешность установки частоты в режиме непрерывной генерации (НГ) $\pm 5 \cdot 10^{-5} \cdot f_{max}$;

- диапазон автоматической перестройки частоты изменяется в пределах от максимального (полный диапазон) до минимального 100 МГц (Δf_{min}).

Генератор построен с использованием разработанного в лаборатории процессорного блока управления, на основе которого уже изготовлены генераторы в диапазонах 25,86–37,5 ГГц и 78,33–118,1 ГГц.

Следует отметить, что по схеме, приведенной на рис. 1, оказалось невозможным построить генераторы в диапазоне более высоких частот, так как предварительный делитель имеет свою граничную частоту порядка 18 ГГц. В связи с этим схема генераторного блока была модифицирована. Для генерирования СВЧ сигнала в заданном диапазоне частот применена лампа обратной волны (ЛОВ) с электрической перестройкой частоты в соответствующем диапазоне. По данной схеме построен генератор в диапазоне частот 25,86–37,50 ГГц, прошедший государственные приемочные испытания. В результате государственных испытаний данному генератору был присвоен тип Г4-217. Генератор имеет следующие метрологические характеристики:

- полоса качания частоты от 0,02 до 37,50 ГГц;

- пределы допускаемых значений основной погрешности определения частоты и полосы качания $\pm 0,002 f_{max}$;

- кратковременная нестабильность частоты в режиме ручной перестройки частоты $\pm 2 \cdot 10^{-10} f_{max}$.

В настоящее время к проведению государственных испытаний подготовлен ГКЧ в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц, выполненный по аналогичной схеме и имеющий метрологические характеристики не хуже указанных.

Панорамные измерители коэффициентов отражения и передачи

Серийно выпускаемая до 1992 г. измерительная техника миллиметрового диапазона длин волн, включающая в себя измерители амплитудных и фазовых параметров, охватывает диапазон частот от 25 до 37 ГГц. В диапазонах от 37 до 178 ГГц имеются отдельные приборы для измерения только амплитудных параметров, источники сигналов и измерительные линии.

В лаборатории аппаратуры и устройств СВЧ разработаны и изготовлены панорамные измерители коэффициентов отражения (КО) и передачи (КП) (скалярные анализаторы цепей САЦ), предназначенные для измерения модулей S-параметров в диапазонах 25,00–37,5 ГГц и 78,33–118,10 ГГц. Совместно с высокочувствительными детекторами, измерительными мостами или направленными ответвителями, составляющими СВЧ измерительный тракт, в состав САЦ входят ГКЧ и персональный компьютер, выполняющий роль высокочувствительного устройства и индикаторного устройства (рис. 2).

Данный вариант САЦ имеет ряд преимуществ по сравнению с известными измерителями вида P2. Во-первых, применением в качестве источника измерительного сигнала высокостабильного ГКЧ достигается более высокая точность установки частоты. Используемое программное обеспечение позволяет осуществить более качественную калибровку прибора за счет применения усовершенствованных алгоритмов калибровки и измерения.

Для измерения как амплитудных, так и фазовых параметров применяются так называемые векторные анализаторы цепей (ВАЦ). Ближайшими зарубежными аналогами ВАЦ являются модели HP 810 фирмы "Hewlett-Packard" и 5600 фирмы "Wiltron". Одним из существенных недостатков как указанных ВАЦ, так и существующих в СССР аналогов является невозможность измерить все S-параметры исследуемого устройства без его отключения и перестыковки. В качестве еще одного недостатка следует отметить ограничение размеров подключаемого объекта измерения из-за жесткого расположения входных фланцев. Кроме того, имевшиеся ранее ВАЦ имели недостаточный динамический диапазон и точность измерения S-параметров, что вызвано

определенными трудностями, связанными с тем, что на СВЧ геометрические размеры сечения волновода становятся сравнимыми с длиной волны.

В лаборатории разработан и изготовлен ВАЦ гомодинного типа, работающий в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц.

Работа ВАЦ основана на принципе направленного ответвления падающей на объект измерения (ОИ) и отраженной (или прошедшей) от него волн СВЧ сигнала, распространяющихся в измерительном тракте анализатора; формирования и выделения напряжений, несущих информацию о реальных составляющих измеряемых S -параметров; усиления и дискретного преобразования этих напряжений; вычисления с помощью прямого и обратного преобразований Фурье сигналов, несущих информацию о мнимых составляющих S -параметров; вычисления значений измеряемых параметров по специальным алгоритмам с использованием параметров калибровки; воспроизведения частотных зависимостей измеряемых параметров либо в полярной (параметры S_{11} и S_{22}), либо в декартовой системе координат (все S -параметры) с отсчетом значений S_{ij} на любой частоте (в пределах диапазона рабочих частот ВАЦ).

Структурная схема ВАЦ приведена на рис. 1, а на рис. 2 — структурная схема СВЧ ИТ, который является основой ВАЦ, определяющей его принцип действия и функциональные возможности.

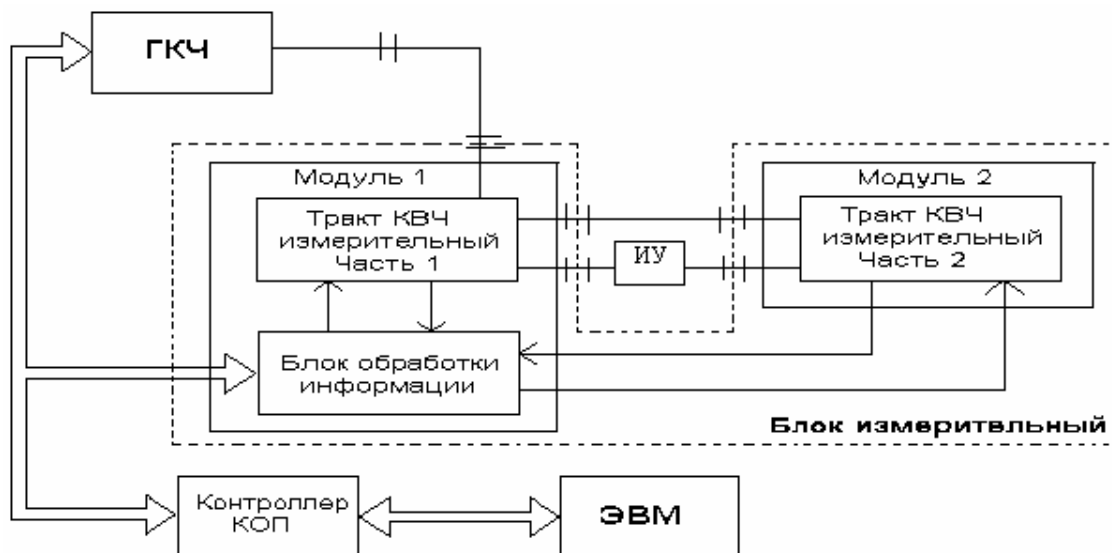


Рис. 2. Структурная схема ВАЦ

Представленный вариант ВАЦ обладает расширенным динамическим диапазоном (на 10 дБ большим, чем у известных зарубежных аналогов), малой погрешностью измерений модулей S -параметров (не более $\pm 0,2$ дБ) и, что немаловажно, достаточно низкой стоимостью. Кроме того, ВАЦ позволяет одновременно измерить все 8 параметров исследуемого устройства без его отключения и перестыковки, а также позволяет подключать объекты измерений любых габаритов за счет выполнения СВЧ измерительного такта в виде двух блоков (рис. 3). Данное схемное решение защищено патентом [1].

Еще одной особенностью разработанного ВАЦ является интерактивное мультимедийное программное обеспечение, позволяющее в реальном масштабе времени отображать результаты измерений и активно воздействовать на процессы калибровки и обработки результатов измерений. Управление по стандартным линиям связи позволяет объединить несколько анализаторов для разных частотных диапазонов в локальную информационно-измерительную сеть.

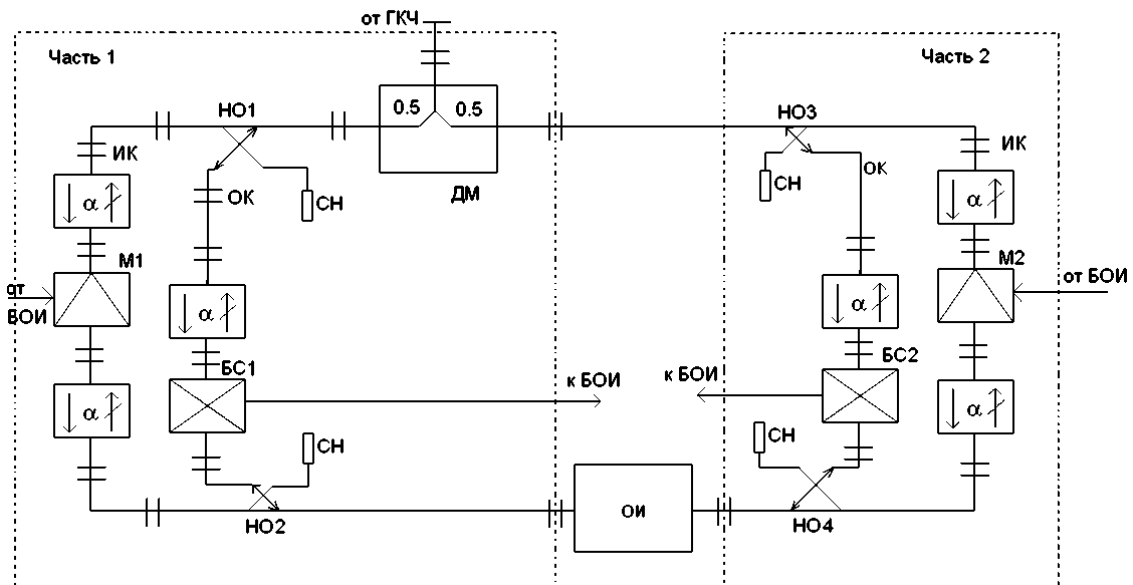


Рис. 3. Структурная схема СВЧ ИТ ВАЦ

Но самым оригинальным, на наш взгляд, решением является разработка математической модели СВЧ измерительного тракта при использовании калибровочных мер и принципиально нового алгоритма калибровки, что позволило добиться расширения функциональных возможностей и повышения точностных характеристик ВАЦ.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных при использовании образцового поляризационного аттенюатора и набора калибровочных мер фазового сдвига, показали следующее:

- основная погрешность установки и отсчета частоты не более 1%;
- пределы измерения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ от 0 до минус 32 дБ;
- пределы измерения $|S_{21}|$ и $|S_{12}|$ четырехполюсников от +30 до минус 60 дБ;
- пределы измерения аргументов всех S-параметров от 0 до 360° или от минус 180° до +180°;
- основная погрешность измерения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ не более $\pm(0,1+0,04 |S_{11(22)}|)$ дБ;
- основная погрешность измерения $|S_{21}|$ и $|S_{12}|$ не более $\pm(0,1+0,03 |S_{21(12)}|)$ дБ;
- основная погрешность измерения $\arg S_{11}$ и $\arg S_{22}$ не более $\pm(3,5^\circ+0,1^\circ |S_{11(22)}|)$;
- основная погрешность измерения $\arg S_{21}$ и $\arg S_{12}$ не более $\pm(2,5^\circ+0,1^\circ |S_{21(12)}|)$.

Метрологическое обеспечение ВАЦ

Как уже указывалось ранее, улучшенные метрологические характеристики разработанного ВАЦ в части измерения аргументов S-параметров достигаются, в частности, использованием оригинальных алгоритмов калибровки, а также мер фазового сдвига.

В качестве мер фазового сдвига использовались короткозамкнутые отрезки волноводов различной длины для воспроизведения фазовых сдвигов КО. Для воспроизведения фазовых сдвигов КП использовались эти же отрезки, но уже не короткозамкнутые.

В общем случае мера фазового сдвига представляет собой два отрезка волновода с фиксированной разностью длин, обеспечивающей разность фазовых набегов 90 и 180° на средней частоте диапазона. В частотном диапазоне 78,33–118,10 ГГц используются меры длиной 4,97 и 5,45 мм для воспроизведения фазового сдвига 90° и 4,97 и 5,93 мм для воспроизведения фазового сдвига 180°.

Учитывая малые потери в мерах, фазовые сдвиги коэффициентов отражения и передачи рассчитываются по формуле

$$\varphi = \frac{360 \cdot \Delta l}{\lambda_o} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{2a}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\lambda_o = c/f$ — длина волны в свободном пространстве; c — скорость света в свободном пространстве; f — частота сигнала генератора; Δl — разность между длинами измерительного тракта на первом и втором этапах воспроизведения фазовых сдвигов; a — ширина канала мер.

Суммарная стандартная неопределенность U_c воспроизведения фазовых сдвигов может быть определена учетом стандартных неопределенностей, обусловленных различными факторами:

$$U_c = \sqrt{U^2(\Delta l) + U^2(f) + U^2(a) + U^2(R_z)}, \quad (2)$$

где $U(\Delta l) = \frac{\partial \varphi}{\partial(\Delta l)} U_{\Delta l} = \frac{360}{\lambda_o} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{2a}\right)^2} U_{\Delta l}$ — стандартная неопределенность воспроизведения фазовых сдвигов, обусловленная неточностью измерения разности между длинами измерительного тракта на первом и втором этапах воспроизведения фазовых сдвигов ($U(\Delta l)$ — стандартная неопределенность измерения Δl);

$U(f) = \frac{\partial \varphi}{\partial f} f U_{\delta f} = \frac{360 \Delta l}{\lambda_o} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{2a}\right)^2} \left[1 + \frac{\lambda_o^2}{4a^2 [1 - (\lambda_o/2a)^2]} \right] U_{\delta f}$ — стандартная неопределенность воспроизведения фазовых сдвигов, обусловленная неточностью установки рабочей частоты генератора ($f \cdot U_{\delta f}$ — стандартная неопределенность установки рабочей частоты);

$U(a) = \frac{\partial \varphi}{\partial a} U_a = \frac{90 \Delta l \cdot \lambda_o}{a^3 \sqrt{1 - (\lambda_o/2a)^2}} U_a$ — стандартная неопределенность воспроизведения фазовых сдвигов, обусловленная неточностью воспроизведения ширины канала a (U_a — стандартная неопределенность измерения a);

$U(R_z) = \frac{\partial \varphi}{\partial R_z} U_{Rz} = \frac{360}{\lambda_o} \sqrt{1 - (\lambda_o/2a)^2} U_{Rz}$ — стандартная неопределенность воспроизведения фазовых сдвигов из-за шероховатости поверхности фланцев (U_{Rz} — стандартная неопределенность измерения высоты неровностей поверхности фланцев по десяти точкам).

Оценка расширенной неопределенности воспроизведения фазовых сдвигов находится из формулы

$$U = K \cdot U_c, \quad (3)$$

где $K=2,0$ — коэффициент охвата для доверительной вероятности $P=0,95$.

Автоматический измеритель флуктуаций

С повышением требований к качеству СВЧ сигналов в связи с развитием ряда новейших направлений радиоэлектроники и освоением миллиметрового диапазона длин волн возникла необходимость в разработке автоматического измерителя флуктуаций амплитуды, частоты и вносимой флуктуации фазы СВЧ сигнала.

При построении измерителя флуктуаций (ИФ) СВЧ сигнала отрабатывалось несколько вариантов схем, из которых наиболее подходящей оказалась схема двухканального измерителя с использованием балансного смесителя в качестве детектора и схемой подавления несущей в канале 2 (рис. 4).

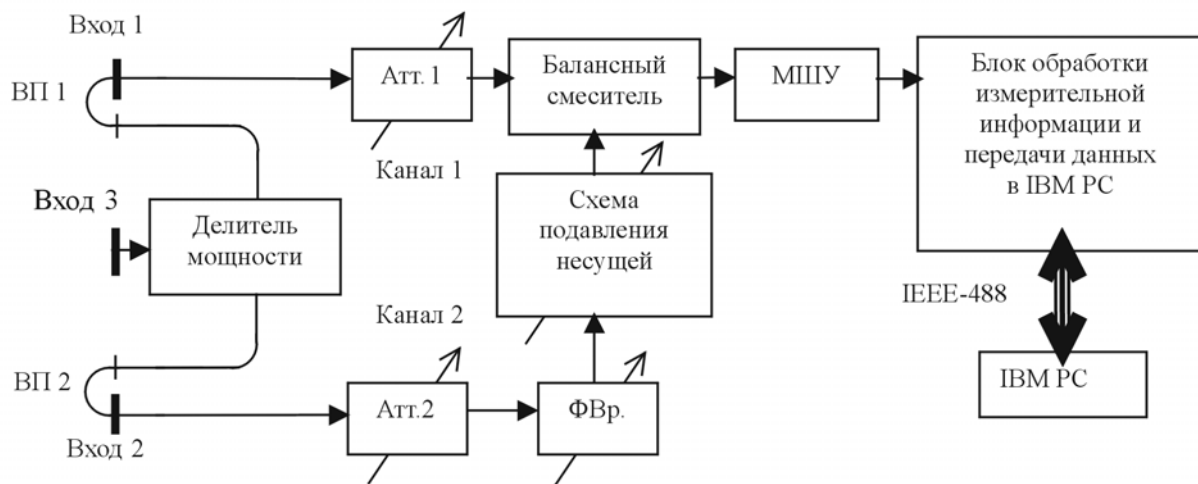


Рис. 4. Измеритель амплитудных, частотных и фазовых флуктуаций СВЧ сигналов: Атт.1 и Атт.2 — аттенюаторы; ФВр. — фазовращатель; МШУ — малошумящий усилитель; ВП 1 и ВП 2 — волноводные переходы, которые конструктивно выведены из корпуса прибора

IBM PC выполняет функции сбора измерительной информации, обработки информации в соответствии с математической моделью измерительного тракта ИФ, подготовки и вывода результатов на экран монитора; ряда пользовательских функций.

При измерении амплитудных шумов используется метод прямого детектирования по одноканальной схеме (в канал 2 вносится максимальное затухание аттенюатором 2 и схемой подавления несущей).

Точность измерения флуктуаций в значительной степени зависит от правильности оценки величины коэффициента, характеризующего форму ВАХ диода балансного смесителя — K_g .

При измерении частотных флуктуаций СВЧ сигналов используется двухканальная схема ИФ. Во втором канале используется схема подавления несущей. Дополнительное подавление несущей осуществляется за счет балансных свойств смесителя на 18–25 дБ.

В отличие от всех ранее описанных и разработанных схем измерителей флуктуаций, в предложенном варианте в качестве блока обработки результатов измерений используется компьютер типа IBM PC. Это позволяет учесть в математической модели измерений и собственные шумы диодов смесителей, и коэффициент, характеризующий форму детекторной характеристики, и эффективную полосу пропускания низкочастотного тракта, и провести калибровку всего измерителя флуктуаций во всех режимах работы. Добавляется целый ряд пользовательских возможностей: сохранение результатов измерений, их сравнение с ранее полученными результатами, распечатывание результатов на бумаге, графическое представление результатов в различных вариантах. Появляется также возможность усовершенствования математического алгоритма и математических моделей измерителя флуктуаций.

Результаты измерения частотных и амплитудных флуктуаций двух генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн с помощью описанного измерителя флуктуаций приводятся на рис. 5 (*a* — частотные шумы, *b* — амплитудные шумы). На рисунках штриховой линией показаны флуктуационные характеристики генератора с диэлектрическим резонатором и умножителем частоты, сплошной линией — характеристики СВЧ генератора на лавинно-пролетном диоде.

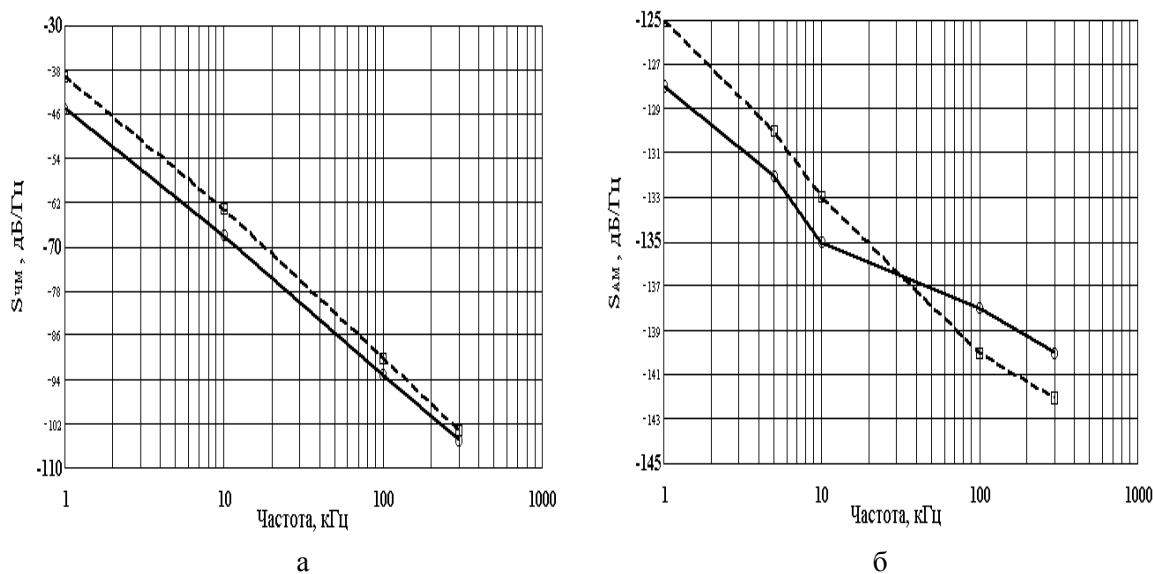


Рис. 5. Частотные (а) и амплитудные (б) флуктуации СВЧ генераторов в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц

Чувствительность измерителя флуктуаций ограничивают в основном собственные низкочастотные шумы смесительных диодов, а также неоптимальная величина нагруженной добротности резонатора в схеме подавления несущей.

Заключение

Исследования в области разработки и изготовления СВЧ измерительных приборов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, отвечающих современным требованиям в части электрических, эксплуатационных и метрологических характеристик, весьма актуальны.

В итоге проведенной работы по результатам теоретического исследования математических моделей измерительных трактов векторных анализаторов цепей предложена обобщенная модель кольцевых трактов ВАЦ, разработаны и изготовлены измерительно-вычислительный комплекс, комплекты мер фазового сдвига, генератор качающейся частоты, измеритель флуктуаций; решены вопросы их метрологического обеспечения.

Отличительной особенностью данной работы явилось экономически и технически эффективное использование имеющегося в БГУИР, в частности, в испытательной лаборатории аппаратуры и устройств сверхвысоких частот, аккредитованной в Системе аккредитации поверочных и испытательных лабораторий Республики Беларусь, оборудования.

Результаты работы планируется использовать для улучшения метрологических характеристик векторных анализаторов цепей и расширения области аккредитации лаборатории.

Комплекс эталонных средств измерения СВЧ мощности

Имеющиеся в эксплуатации средства измерения мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,50 до 178,60 ГГц не обеспечены поверкой и калибровкой из-за отсутствия образцовых средств измерений и эталонов, что создает определенные сложности в обеспечении точности и достоверности измерений.

В связи с этим были проведены исследования комплекса средств измерений СВЧ мощности в диапазоне частот 37,50–178,60 ГГц. Комплекс средств измерений был аттестован Харьковским государственным научно-исследовательским институтом метрологии (ХГНИИМ) в 2001 г., прошел повторную аттестацию в 2002 г. на базе Украинского государственного специального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,50 до 178,60 ГГц как эталон мощности.

Исследования нестабильности результатов измерений мощности электромагнитных колебаний в установленном режиме в течение 8 ч при температуре окружающей среды 19–21°C показали, что значение этой величины не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$ мВт/мин.

Среднеквадратическое отклонение результатов измерений мощности S_p для первого поддиапазона 37,50–53,57 ГГц не превышает 0,06 мВт, для второго поддиапазона 53,57–78,33 ГГц не превышает 0,007 мВт, для третьего поддиапазона 78,33–118,10 ГГц не превышает 0,08 мВт, для четвертого поддиапазона 118,10–178,60 ГГц не превышает 0,007 мВт.

MEASUREMENT EQUIPMENT FOR MILLIMETER WAVELENGTH RANGE DEVELOPMENT AND METROLOGICAL SUPPORT

A.V. GUSINSKI, M.Y. DERIABINA, A.M. KOSTRIKIN, V.T. REVIN,
Y.A. GOUSUININA, A.B. DZISIAK, A.J. BELSKI, A.V. VOROSHEN, S.S. GOURSKI

Abstract

Superhigh frequency devices parameters measuring modern perspective methods are subjects of analyses. Superhigh frequency sweep generators, vector and scalar network analyzers; superhigh frequency signal amplitude, frequency and phase fluctuations automatic meters and superhigh frequency power for 37,50–178,60 GHz frequency range standard measuring facilities complex are described. VNA metrological support under special design phase shift standards is considered.

Литература

1. Пат. № а 19980615 от 01.07.98 г.
2. Елизаров А.С., Кострикин А.М., Гусинский А.В. и др. // Электроника СВЧ. 1996. Т.41, №5. С. 602-610.
3. Гусинский А.В., Кострикин А.М., Дзисяк А.Б., Хрущ П.С. // Материалы IY МНТК "Современные средства связи", спец. выпуск Изв. Белорус. инж. акад. 1999. №1(7)/1. С. 41-44.
4. Гусинский А.В., Дзисяк А.Б., Хрущ П.С., Белошицкий А.П., и др. // Материалы XI Международной конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Крым, Украина, 2001. С.578-580.
5. ГОСТ 133317-89. Элементы соединения СВЧ трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры.
6. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. // ISO, Switzerland. 1993. 101 p.
7. Горожданов Д.П., Ковальчук И.В., Копусов В.Н. Учет нелинейности детектора при измерении амплитудных флуктуаций квазигармонических сигналов // Техника средств связи. Серия РИТ. 1988. Вып. 11. С.6–11.
8. Ashley J.R., Searles C.B. The measurement of oscillator noise at microwave frequencies // IEEE transactions on microwave. Theory and Techniques. 1968. Vol. MTT-1, №9.